

**Список літератури:** 1. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний систем турбоагрегат-фундамент. – К.: Наукова думка, 1991. – 232 с. 2. Красніков С.В., Степченко О.С., Торянік А.В. Комп'ютерне моделювання багатокорпусного турбоагрегату та аналіз його вібраційних характеристик // Машинознавство. – Львів: Кінпатрі, 2009. – № 2. – С.27-33. 3. Шейнин И.С., Цейтлин Б.В. Теоретическое исследование динамических характеристик ряда фундаментов под мощные турбоагрегаты // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. – 1981. – № 151. – С. 81-87. 4. Красніков С.В. Моделювання та аналіз вібраційних характеристик фундаменту енергоблоку потужністю 300 МВт // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – № 52. – С. 107-111.

*Надійшла до редколегії 31.07.2013*

УДК 519 : 539 : 534

**Моделювання власних коливань фундаменту турбогенератору потужністю 200 МВт / С. В. Красніков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 58 (1031). – С. 88-92. – Бібліогр.: 4 назв.

Наведено результати дослідження власних частот та форм коливань фундаменту турбогенератору потужністю 200 МВт. Проаналізовано частотний спектр у контрольованих діапазонах та відповідні їм форми коливань. Означено місця, що потребують підвищення жорсткості. Моделювання та розрахунки виконано за методом скінчених елементів.

**Ключові слова:** фундамент турбіни, найбільш навантажені зони, моделі руйнування.

The results of the study of natural frequencies and modes of foundation turbogenerator 200 MW are described. The analysis of the frequency range of the controlled ranges and their corresponding forms of vibrations are given. Appointing places, requiring increasing rigidity foundation are completed. Modeling and calculations performed by the method of finite elements.

**Key words:** foundation turbine, most loaded areas, damage model.

УДК 539.3

**Д.В. ЛАВИНСКИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ СИЛАМИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

В статье рассмотрены возможные подходы к анализу напряженно-деформированного состояния технологических систем при действии импульсных электромагнитных полей. Создана расчетная схема системы «индуктор–заготовка» для операции по выправлению дефектов. Задача решена методом конечных элементов. Проанализировано распределение полей напряжений и деформаций в индукторе и заготовке. Сделаны выводы по практическому применению подобных технологических систем.

**Ключевые слова:** импульсные электромагнитные поля, индукторная система, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

© Д.В. Лавинский, 2013

**Актуальность и состояние проблемы.** Системы для обработки материалов силами импульсных электромагнитных полей (ЭМП) являются характерным примером того, как импульсное ЭМП влияет на процесс деформирования элементов системы. Как известно, магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) основана на явлении пластического деформирования заготовок пондеромоторными силами (ПС) ЭМП. При этом ПС в одинаковой степени приводят к возникновению напряжений как в заготовке так и в инструменте (индукторе). Причем опыт эксплуатации различных систем для МИОМ показывает, что нарушение прочности (стойкости) индуктора является очень часто ключевым моментом, которые не позволяет внедрять перспективные расчетные схемы. Таким образом, анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) индукторов при МИОМ с целью оценки их прочности является актуальной научно-практической задачей.

В равной степени анализ НДС заготовок в подобных расчетных схемах также является актуальной задачей. Так как, при МИОМ и индуктор, и заготовка «работают» как единая технологическая система, логично проводить анализ их НДС одновременно, в рамках единой расчетной модели. Сложность геометрии и разнообразные условия закрепления и нагружения, приводят к тому, что наиболее целесообразным является использование численных методов анализа. В данное время наибольшей популярностью пользуется метод конечных элементов (МКЭ), на основе которого создано большое количество программных комплексов. В последнее время МКЭ с успехом применяется не только для решения задач механики деформируемых твердых тел, но и для моделирования и последующего решения задач анализа различных физических полей, в том числе и электромагнитных.

Отметим, что традиционные подходы анализа НДС систем при наличии ЭМП базируются на введении интегральных показателей ПС. Так, при традиционных расчетах систем для МИОМ широко используется понятие, так называемого, магнитного давления, которое прикладывается к поверхностям деформируемых тел. В то же время известно, что ЭМП влияет на всю область, занятую электропроводным телом, то есть ПС являются по своей природе объемными силами. Использование МКЭ позволяет избежать указанного противоречия и учитывать действие ПС в каждой точке электропроводного тела. Отметим также, что традиционные оценки сил ЭМП чаще всего являются приближенными и проводятся на основе аналитических решений для тел канонической формы (полуплоскость, плоскость, полупространство и т.д.).

Одним из направлений, по которым развивается МИОМ является исправление дефектов готовых изделий, что характерно для автомобилестроения и авиапромышленности. Применение МИОМ для, например, выправления вмятин корпусов позволяет производить эту операцию в большинстве случаев без размонтирования конструкции и без повреждения финишного покрытия поверхности. Вмятина в каждом конкретном случае может иметь индивиду-

альную форму и размеры, поэтому анализ НДС систем «индуктор–заготовка с вмятиной» всякий раз будет являться уникальной задачей, и общие рекомендации в данном случае выработаны быть не могут. Более практичным является моделирование процесса взаимодействия индуктора с недеформированной заготовкой. Задача в такой постановке позволяет сделать оценки прочности индуктора и определить зоны возникновения пластических деформаций в заготовке. То есть такой подход может рассматриваться как фундамент для дальнейшего исследования пластического формоизменения заготовки.

Процессы МИОМ являются нестационарными, но воздействие является импульсным, то есть кратковременным. В работах [1,2] показано, что максимальные значения напряжений, перемещений и деформаций наблюдаются на первом максимуме импульса ЭМП. Данный факт позволяет проводить исследования в квазистационарной постановке, где величины внешнего воздействия соответствуют амплитудным значениям в импульсе.

При анализе НДС систем «индуктор–заготовка» необходимо дать ответы на ряд вопросов: оценить прочность индуктора, определить величины внешнего воздействия, при которых в заготовке развиваются пластические деформации и т.д.

В работе [3] показана возможность численного моделирования ЭМП в системах для МИОМ и проведены сравнения численных результатов с экспериментальным и аналитическим решением. Для того, чтобы имелась возможность корректного сопоставления численных и аналитических результатов, в работе использовалась упрощенная расчетная схема, так как только для нее возможно получение аналитического решения. Теперь рассмотрим анализ НДС подобной технологической системы, но уже используя уточненную расчетную схему индуктора.

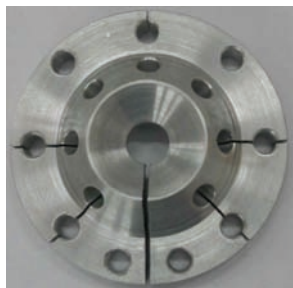


Рисунок 1 – Индуктор

**Постановка задачи и метод решения.** Рассмотрим один из вариантов индуктора, используемого для деформирования тонкостенных элементов конструкций. Индуктор представляет собой массивное тело вращения сложной формы – рис. 1. В центре индуктора выполнено отверстие (окно) в форме усеченного конуса. Реальные особенности геометрии индуктора необходимы для того, чтобы рабочий ток концентрировался по поверхности конического окна и удовлетворял условиям осевой симметрии [4]. Таким образом, в первом приближении индуктор может быть смоделирован как осесимметричное тело вращения.

Рассмотрим совместное деформирование индуктора и тонкой круглой пластины. Расчетная схема решения данной задачи представлена на рис. 2.

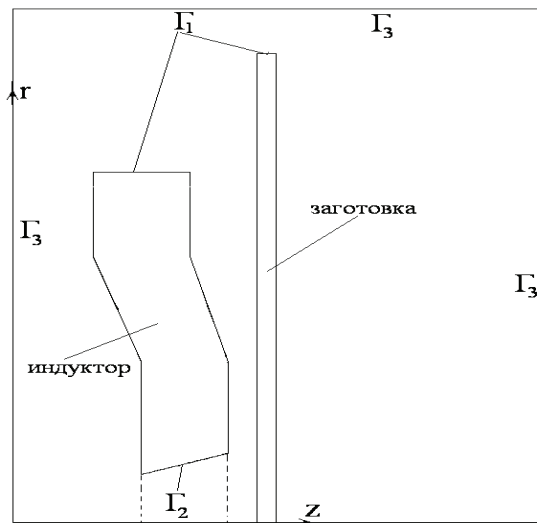


Рисунок 2 – Расчетная схема

Для первоначального анализа распределения компонент ЭМП индуктор и заготовка рассматриваются совместно с окружающей средой (воздухом). Размеры области, заполненной воздухом должны выбираться из условия затухания ЭМП на удалении от источника поля.

Задача решалась по схеме МКЭ согласно осесимметричной постановки. Для этого был введен в рассмотрение векторный магнитный потенциал [5] –  $\vec{A}(r, z, \varphi, t)$ :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (1)$$

В осесимметричной постановке вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  всегда лежит в плоскости модели (в плоскости  $rOz$ ), следовательно векторный магнитный потенциал всегда перпендикулярен к этой плоскости, то есть имеет только одну ненулевую компоненту  $A_\varphi = A$ . Для ненулевой компоненты векторного магнитного потенциала в данном случае может быть построен функционал:

$$\text{Mag} = \iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2\mu_r} \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial z} \right)^2 \right] - 2I_m A \right\} r d\Omega, \quad (2)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость подобласти,  $I_m$  – амплитуда импульса тока. В данном случае ток является источником ЭМП и рассматривается распределенным по линии  $\Gamma_2$ . На внешних границах воздушной среды  $\Gamma_3$  задавались условия затухания ЭМП:

$$A|_{\Gamma_3} = 0. \quad (3)$$

Для использования граничных условий вида (3) необходимо проводить анализ влияния размеров расчетной области на распределение компонент ЭМП вблизи источника поля. Подобный анализ был проведен и показал, что величина окружающей воздушной области перестает влиять на распределение компонент ЭМП при удалении от источника поля на величину равную максимальной толщине индуктора.

Для анализа НДС системы «индуктор–заготовка» рассматривался функционал типа Лагранжа с объемными ПС. В качестве граничных условий рассматривалось закрепление индуктора и заготовки по границам  $\Gamma_1$ . Воздушная среда при анализе НДС из рассмотрения исключалась. Задача решалась по схеме МКЭ в перемещениях с использованием осесимметричного четырехугольного конечного элемента с билинейной аппроксимацией перемещений и векторного магнитного потенциала. При конечно элементном моделировании объемные ПС приводились к узлам конечно-элементной модели.

**Анализ полученных результатов.** Решение было проведено для следующих геометрических параметров системы: внешний диаметр индуктора – 100 мм; толщина индуктора – 15 мм; угол наклона конической поверхности –  $60^\circ$ ; толщина пластины (заготовки) – 2 мм; наименьшее расстояние между индуктором и заготовкой – 2 мм; диаметр заготовки в полтора раза больше, чем диаметр индуктора (это оправдано тем, что подобный индуктор должен использоваться для удаления вмятин на корпусах транспортных средств, то есть его размеры являются меньшими размеров обрабатываемой поверхности). О выборе размеров воздушной среды было сказано выше. Физико-механические свойства элементов расчетной схемы принимались следующими: индуктор – материал медь: относительная магнитная проницаемость  $\mu_r = 1$ , модуль упругости – 180 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,33, предел текучести порядка 200–210 МПа; заготовка – материал сталь: относительная магнитная проницаемость  $\mu_r = 1,3$ , модуль упругости – 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,28, предел текучести порядка 250–280 МПа; воздух: относительная магнитная проницаемость  $\mu_r = 1$ . Задача решалась в квазистационарной постановке, источником поля рассматривался ток, равномерно распределенный по линии  $\Gamma_2$  ( $I_m = 50$  кА).

На первом этапе решения были получены пространственные распределения компонент ЭМП. Мы не будем останавливаться на их анализе, отметим лишь, что полученные распределения в окрестности конического окна индуктора согласуются с численными решениями, приведенными в [3,4]. Далее анализировалось распределение полей напряжений и деформаций в индукторе и заготовке. На рис. 3 представлено деформированное состояние индуктора и заготовки. Видно, что заготовка деформируется в гораздо большей степени, чем индуктор. Это объясняется конструктивными особенностями: индуктор более массивное тело. Анализ перемещений точек, принадлежащих индуктору, свидетельствует, что их значения не велики, то есть в процессе

работы форма индуктора практически не искажается, и, соответственно, создаваемое ЭМП будет иметь стабильную пространственную конфигурацию. Максимальные перемещения заготовки наблюдаются непосредственно напротив конического окна индуктора. На рис. 4 представлено распределение интенсивности напряжений. Видно, что максимальные значения интенсивности напряжений, как в индукторе, так и в заготовке наблюдаются в окрестности конического окна, то есть в непосредственной близости от источника поля. Можно прогнозировать, что применение подобного типа индуктора для выправления дефектов будет оправдано, так как наибольшие напряжения действительно возникают в непосредственной близости от рабочей зоны (конического окна). Максимальная интенсивность напряжений в заготовке превышает предел текучести материала, то есть при данной величине внешнего воздействия (величине силы тока) заготовка будет деформироваться пластически. Но, и в индукторе максимальные значения интенсивности напряжений также превышают предел текучести, что может отрицательно сказаться на его работоспособности (например, вызвать явление малоциклового усталости при повторных включениях). Для ликвидации данного явления необходимо применять особые конструктивные решения, одним из которых может быть использование бандажей из непроводящих материалов. Бандажи, присоединенные с натягом, создадут предварительное напряженное состояние, которое, при наложении рабочих напряжений понизит их.

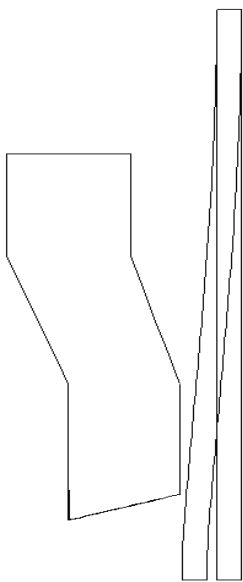


Рисунок 3 – Деформированное состояние индуктора и заготовки



Рисунок 4 – Распределение интенсивности напряжений

**Выводы.** Рассмотрены возможные пути численного моделирования и анализа НДС технологических систем при действии импульсных ЭМП. Для одного варианта индукторной системы создана расчетная схема и на базе МКЭ проведен анализ НДС. По результатам проведенного анализа сделаны предложения по улучшению работоспособности индуктора.

**Список литературы:** 1. Лавинский Д.В. Колебания круглой пластины в переменном магнитном поле / Лавинский Д.В. // Матем. мет. в техн. и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. – Т. 3. Секции 5 / Под общ. ред. А.А.Большакова. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; X.: Национ.техн. ун-т «ХПИ», 2012. – 184 с. – С. 58-59. 2. Oleg K. Morachkovsky Nonlinear dynamics of a thin plate in a nonstationary electromagnetic field of the inductor / Oleg K. Morachkovsky, Denis V. Lavinsky // Нелінійна динаміка / Тезиси доповідей 4-ої міжнародної конференції (19-22 червня., 2013р., Севастополь). – X.: Вид-во «Точка», 2013. – С. 299-304. 3. Лавінський Д.В. Моделювання та аналіз імпульсних електромагнітних полів у системах для обробки матеріалів / Лавінський Д.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – X.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 67 (973). – С. 61-67. 4. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография / Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатюв А.В. – X.: ХНАДУ, 2009. – 240 с. 5. Тозони О.В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / Тозони О.В., Маергойз И.Д. – К.: Техніка, 1974. – 352 с.

Поступила в редколлегию 22.07.2013

УДК 539.3

**Анализ напряженно-деформированного состояния систем для обработки материалов силами импульсных электромагнитных полей / Д.В. Лавинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – X.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 58 (1031). – С. 92-98. – Бібліогр.: 5 назв.**

У статті розглянуто можливі підходи до аналізу напружено-деформованого стану технологічних систем при дії імпульсних електромагнітних полів. Створена розрахункова схема системи «індуктор-заготовка» для операції з виправлення дефектів. Задача розв'язана методом скінчених елементів. Проаналізовано розподіл полів напружень і деформацій в індукторі та заготовці. Зроблені висновки щодо практичного застосування подібних технологічних систем.

**Ключові слова:** імпульсні електромагнітні поля, індукторна система, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан.

The possible approaches to the analysis of the stress-strain state technological systems under the action of pulsed electromagnetic fields are considered in the article. The settlement scheme for the system of the «inductor-billet» for correct of defects is created. The problem is solved by the finite element method. The distribution of stress and strain fields in inductor and billet is analyzed. Conclusions for the practical application of such technological systems are made.

**Keywords:** pulse electromagnetic fields, inductor system, finite element method, stress-strain state.